Revista
Brasileira de

ASTRONOMIA

Produzida pela Sociedade
Astronômica Brasileira

Ano 1 | Número 2

ESPECIAL:

100 ANOS DO ECLIPSE DE SOBRAL

Quatro pontos de vista da importância desse evento para a Ciência no Brasil e no Mundo.

Editorial

Num mundo cada vez mais obcecado pelo culto à celebridade, não há quem não conheça ou nunca tenha ouvido falar sobre Albert Einstein. Muito antes dos meios de comunicação massificarem as notícias, Einstein já era notoriamente reconhecido e festejado, tornando-se o protótipo da representação de um cientista na cultura popular. Mas para entender Einstein e o fascínio que suas caretas registradas em foto exercem no imaginário da humanidade, precisamos voltar 100 anos e conhecer o experimento que o consagrou: o eclipse de 1919 observado em Sobral, no Ceará, bem como na ilha do Príncipe, na costa leste da África. Celebremos, portanto, este centenário! Esta edição especial da Revista Brasileira de Astronomia é inteiramente dedicada ao eclipse que iluminou as páginas da história da Ciência no Brasil. Quatro pesquisadores, de quatro instituições diferentes, discutem implicações daquele experimento, muitas das quais bastante atuais.

O segundo número da Revista Brasileira de Astronomia chega num momento muito delicado, em que a situação econômica do país e cortes no orçamento público destinado à Ciência e Educação ameaçam o funcionamento de institutos de pesquisa e universidades. A posição da Sociedade Astronômica Brasileira é a mesma das demais sociedades científicas, exposta na nota da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência: os cortes orçamentários comprometem todo o sistema de ciência e tecnologia construído ao longo de décadas no país, e o desmantelamento das redes de pesquisa será irreversível. Política científica requer investimento de longo prazo para que os resultados se concretizem; justamente por isso a lógica imediatista não pode ser aplicada a uma atividade que, por sua própria natureza, exige método, paciência e reflexão.

Helio J. Rocha-Pinto
Editor

Esquerda
Einstein durante uma aula pública em Viena, em 1921. Imagem restaurada por Adam Cuerden (Crédito: Wikimedia Commons).
Capa
Eclipse solar.
Crédito: solarseven/iStock.com. Arte: Camila Lustosa.

Revista Brasileira de Astronomia

produzida pela
Sociedade Astronômica Brasileira

Conselho Editorial Allan Alves Britto, Reinaldo Ramos de Carvalho, Lucimara Martins, Ramachrisna Teixeira, Thiago Signorini Gonçalves
Editor Helio J. Rocha-Pinto
Equipe de colaboradores Hélio Dotto Perottoni, Maria Luiza Ubaldo de Mello, Mylena Silva de Araújo, Matheus Bernini Peron, Douglas Brambila dos Santos

Contato secsab@sab-astro.org.br
Para anunciar Fale com Rosana no email acima ou ligue (11) 3091-8684, Seg. a Sex. 10 às 16 h.
Para submissões
Contacte um membro do conselho editorial

Presidente
Reinaldo Ramos de Carvalho
Vice-Presidente
Helio J. Rocha-Pinto
Secretário-Geral
Ramachrisna Teixeira
Secretário
Allan Alves de Brito
Tesoureira
Lucimara Martins
Endereço
Sociedade Astronômica Brasileira
Rua do Matão, 1226
05508-090 São Paulo – SP
http://www.sab-astro.org.br

4 **Ondas gravitacionais e Sobral**

Cecilia Chirenti escreve sobre as excitantes descobertas dos detectores de ondas gravitacionais e sua relação com a centenária comprovação da Teoria da Relatividade em Sobral.

12 **O eclipse de Sobral**

Christina Helena Barbosa fala sobre os bastidores da escolha de Sobral para o célebre experimento de 1919 e sobre o papel dos brasileiros nessa expedição.

22 **100 anos de lentes gravitacionais**

Martin Makler explica o que são lentes gravitacionais e como elas se relacionam com teoria da relatividade.

32 **Galáxias em um universo relativístico**

Thiago Signorini Gonçalves conta como as galáxias distantes mostram um universo compatível com a teoria de Einstein.

Ondas Gravitacionais e Sobral

Tênues mensageiras de violentas colisões cósmicas, as ondas gravitacionais são o futuro da astronomia. As novas observações são descendentes diretas do eclipse de Sobral.

Cem anos atrás, em 1919, foi realizada uma das primeiras verificações da teoria da relatividade geral do físico alemão Albert Einstein, em duas expedições organizadas pelo astrônomo inglês Arthur Eddington. Apenas um ano após a 1.ª guerra mundial, era notável que ingleses e alemães pudessem colaborar em prol da ciência. E naquela época a relatividade geral era considerada uma teoria tão complicada que corria o boato de que somente três pessoas no mundo conseguiam entendê-la!

Essa teoria complicadíssima descrevia o espaço (como o espaço interestelar) e o tempo (medido pelo seu relógio) como um espaço-tempo em 4-dimensões, que pode ser distorcido como aqueles relógios derretidos de Sal-

vador Dali. Com uma estrutura matemática muito sofisticada, a relatividade geral mudava a maneira como entendemos o universo e uma das suas forças fundamentais, a gravidade.

Testando a teoria

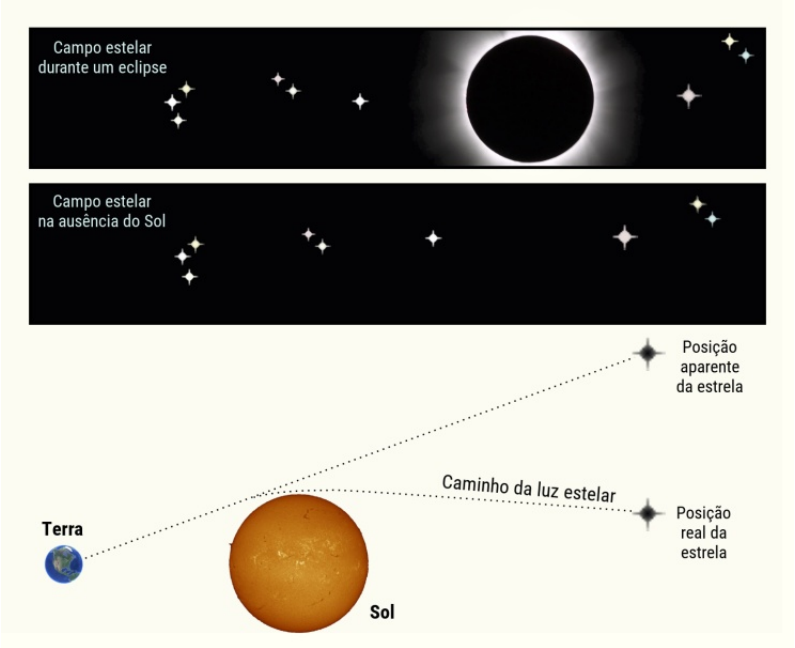
Mas uma das características fundamentais da ciência é um princípio absolutamente igualitário: nenhuma teoria deve ser aceita simplesmente porque foi proposta por um cientista famoso e respeitado, ou porque os outros cientistas "gostam" dela. Todas as teorias devem fazer previsões que possam ser testadas por observações ou medições da natureza. Se falharem no teste, devem ser descartadas!

Mas atenção! Se quisermos ser mais precisos, podemos dizer que as teorias têm um *domínio de validade*, que os testes ajudam a determinar. Assim, a relatividade geral explica os feitos da gravidade onde a lei da Gravitação Universal de Newton já não dá resultados exatos — mas isso não quer dizer que Newton estava "errado".

Por isso era muito importante conseguir realizar testes dessa nova teoria da relatividade geral, que havia sido proposta em 1915. E isso não era fácil, porque era difícil até calcular quais eram as predições da teoria. Um dos primeiros testes era relacionado ao cálculo da órbita do planeta Mercúrio, o mais próximo ao Sol no Sistema Solar. Quando a órbita de Mercúrio era calculada usando tudo o que se sabia sobre a lei da gravitação universal de Newton e o resultado era comparado com as observações, via-se que restava um erro minúsculo nos cálculos, de 43" de arco por século (lembre-se que 1º = 60' e 1' = 60"). Quando Einstein usou a sua teoria e encontrou o resultado exato, ele ficou tão emocionado que teve até palpitações!

Mas não adianta ter uma teoria que passe em um teste só. Todas as teorias devem ser continuamente testadas e assim a confiança que os cientistas têm nelas aumenta com o tempo. Em 1919 foi testada uma outra previsão da relatividade geral. A teoria previa que até mesmo a luz deveria ser desviada pela distorção (ou curvatura) do espaço-tempo. Mas como seria possível verificar isso?

Este novo teste teria que ser feito durante um eclipse total do Sol, quando as estrelas que estão no céu (mas são invisíveis duran-



Acima
Efeito do desvio da luz das estrelas durante um eclipse do sol. O efeito está muito exagerado no desenho, e as distâncias e tamanhos relativos dos corpos não estão em escala.

Na página anterior
Snapshot de uma simulação da colisão de dois buracos negros (Crédito: Simulating eXtreme Spacetimes Lensing — SXS).

te o dia) estariam visíveis. A luz dessas estrelas seria desviada pela curvatura do espaço-tempo causada pelo sol, causando um desvio de no máximo 1,75" de arco na direção em que essas estrelas seriam observadas!

Os resultados deveriam ser comparados a um cálculo equivalente realizado com a Física Newtoniana, que prevê um desvio duas vezes menor. Mas esse cálculo precisa supor que a luz seja formada por partículas de massa finita. Hoje sabemos que essas partículas de luz (chamadas fótons) possuem massa nula, e o cálculo Newtoniano é incorreto.

Eclipses totais do Sol acontecem raramente e, quando ocorrem, são visíveis de apenas alguns locais do planeta. A primeira oportunidade para fazer esse teste aconteceu em 1919, quando duas expedições foram enviadas para fazer as medições na Ilha do Príncipe, na costa da África Ocidental, e na cidade de Sobral no Ceará, Brasil. Era necessário ter duas expedições em lugares diferentes, caso em um deles o céu estivesse nublado e não fosse possível fazer observações. Depois que os dados foram analisados, os resultados confirmaram a teoria da relatividade geral de Einstein, que se tornou uma celebridade da noite para o dia! Isso é muito raro para um cientista...

A curvatura do espaço-tempo, por mais estranha e difícil de entender, parecia ser uma realidade. Objetos astronômicos com uma grande massa, como o nosso Sol, curvavam o espaço-tempo e podiam até mesmo entortar a luz. Quais outras consequências bizarras poderiam vir dessa teoria? Havia muitas outras estranhezas ainda por vir: buracos negros, buracos de minhoca, viagens no tempo, universos paralelos... Muitas consequências estranhas da teoria passaram a habitar os livros de ficção científica. Mas por enquanto, só temos confirmação da existência dos buracos negros!

Ainda em 1916, Einstein havia previsto que o espaço-tempo poderia ter ondas. Essas ondas gravitacionais se propagariam com a velocidade da luz, distorcendo o espaço-tempo (e tudo mais que estivesse no meio do caminho). Mas o cálculo que previa a existência dessas ondas era muito difícil, e o próprio Einstein errou algumas vezes na conta. Uma hora ele achava que elas deveriam existir, depois achava que não. No final, ele chegou à conclusão que elas existiam, mas seriam pequenas demais para serem detectadas.

Com o passar dos anos, mais cientistas começaram a estudar teoricamente essas ondas. E chegaram à conclusão de que elas deveriam existir, sim. E seriam muito pequenas, de fato. Mas talvez fosse possível observá-las! E assim começou um esforço científico internacional que durou muitas décadas, para medir diretamente a curvatura do espaço-tempo cujos efeitos foram observados pela primeira vez em Sobral e na Ilha do Príncipe em 1919. Essa história já rendeu dois prêmios Nobel

Curiosidades

A massa do sol é de 2×10^{30} kg, ou mais de 300.000 vezes a massa da Terra.

Uma vez, no final de uma palestra, perguntaram a Eddington: "Professor, o sr. deve ser uma das três pessoas no mundo que entendem essa teoria do Einstein!"; e ele respondeu "Estou tentando pensar quem seria a terceira pessoa..."

O próximo eclipse total será em 2 de julho de 2019, visível apenas em algumas partes da Argentina e do Chile. No Brasil, teremos que esperar até 12 de agosto de 2045, quando teremos um eclipse total visível em alguns estados do nordeste!

de Física, em 1993 e em 2017, e com certeza ainda promete mais.

Da teoria para a prática

Levou quase 100 anos desde a previsão inicial de Einstein até a primeira detecção direta das ondas gravitacionais em 2015. No meio do caminho, tivemos a detecção indireta realizada através da observação do pulsar PSR1913+16 por Joseph Taylor e Russel Hulse da Universidade de Massachussets Amherst nos Estados Unidos. Eles mediram o período do pulsar durante mais de 20 anos e verificaram que o pulsar estava acelerando, e o seu período ficava alguns segundos mais curto por década, como deveria ser se ele estivesse perdendo energia pela emissão de ondas gravitacionais como previsto pela teoria. Foram eles que ganharam o prêmio Nobel em 1993, pelo trabalho começado lá na década de 70.

As primeiras tentativas para detectar ondas gravitacionais diretamente começaram com os experimentos de Joseph Weber na Universidade de Maryland, nos Estados Unidos, na década de 60. Mas essas medidas eram muito difíceis de serem feitas — talvez possamos dizer que são as medidas mais difíceis que já foram realizadas! Detectores de ondas gravitacionais precisam medir movimentos que são 10000 vezes menores do que o núcleo de um átomo.

Detectores de ondas gravitacionais foram sendo gradualmente desenvolvidos em vários países, com projetos na Europa (Itália, Holanda, Alemanha), Estados Unidos, Brasil, Japão e recentemente na Índia. Os primeiros projetos seguiram o modelo de Weber, por massa ressonante, e os projetos mais modernos envolvem interferômetros laser.

Essas medidas tão minúsculas deveriam ser causadas por eventos catastróficos e gigantescos, porém muito distantes. Colisões de buracos negros com massas maiores do que as do nosso Sol, ou de estrelas de nêutrons, tão compactas que uma colher de chá da sua matéria pesa mais do que 10 milhões de toneladas. Esse ti-

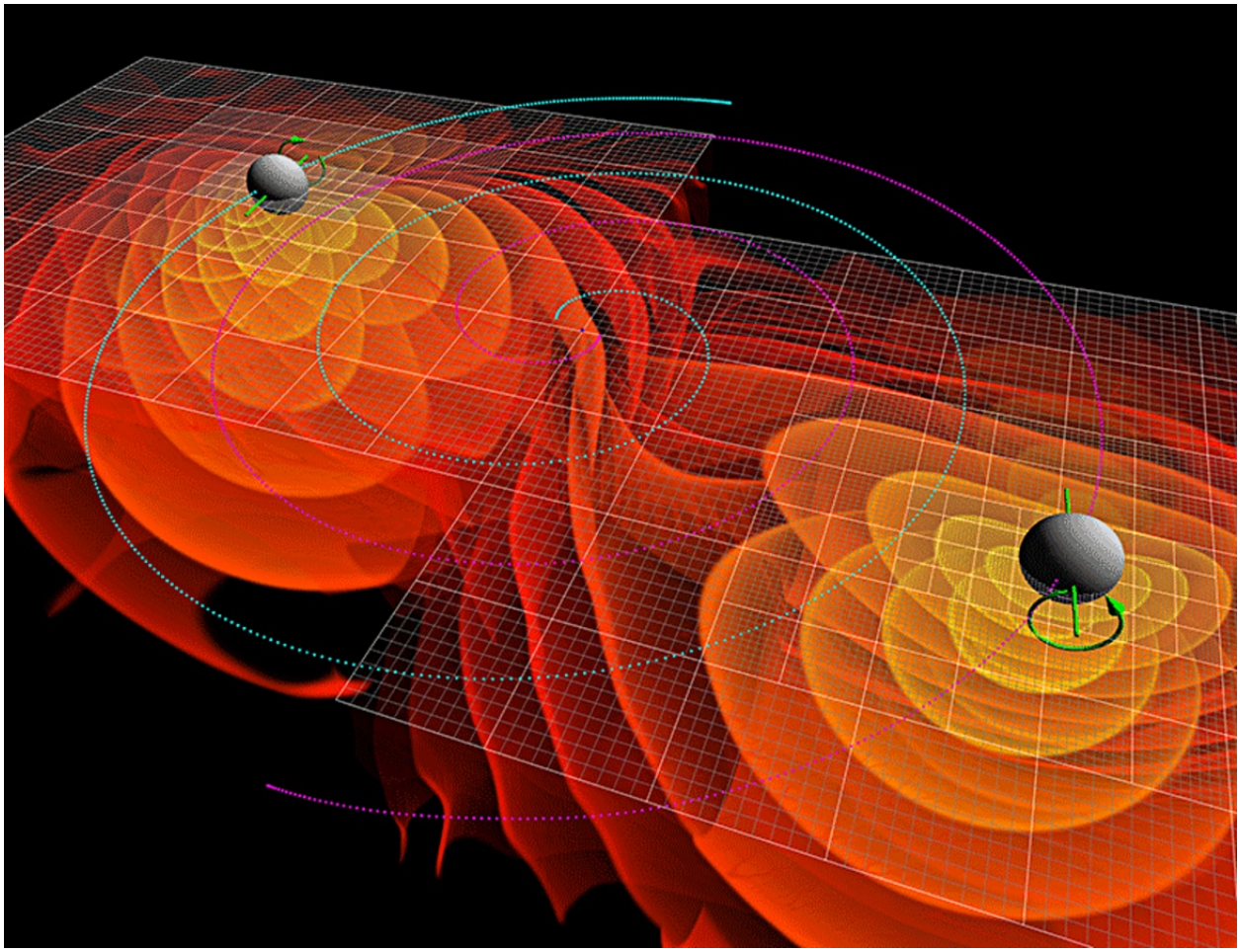
po de evento superenergético, acontecendo bem longe em outra galáxia, seria capaz de fazer nossos detectores captarem um ínfimo suspiro desse acontecimento aqui na Terra.

A primeira detecção

Foi necessário um esforço internacional de décadas e milhares de cientistas. Mas em 14 de setembro de 2015 foi realizada a primeira detecção direta de ondas gravitacionais pela colaboração LIGO (do inglês *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*). O anúncio da detecção teve que esperar até 11 de fevereiro de 2016, porque os pesquisadores queriam ter muita certeza de que a análise dos dados estava correta. Isso porque os resultados foram fenomenais! E foi por esse feito que a equipe do LIGO, representada por Kip Thorne, Rai Weiss e Barry Barish recebeu o prêmio Nobel em 2017.

O evento que causou essa primeira detecção foi a colisão de dois buracos negros, que aconteceu a mais de 1 bilhão de anos-luz da Terra. Ou seja, tudo aconteceu 1 bilhão de anos atrás! Compare: a idade da Terra é de aproximadamente 4,5

Abaixo
Snapshot de uma simulação computacional que mostra as órbitas de dois buracos negros em um sistema binário e a sua emissão de ondas gravitacionais (Crédito: NASA/Ames Research Center/C. Henze).



Acima
Alunos e professores em visita ao detector de ondas gravitacionais Virgo na Itália, em 2005. A autora deste artigo era uma das alunas que participou dessa visita. (Crédito: Acervo pessoal de Cecília Chirenti)

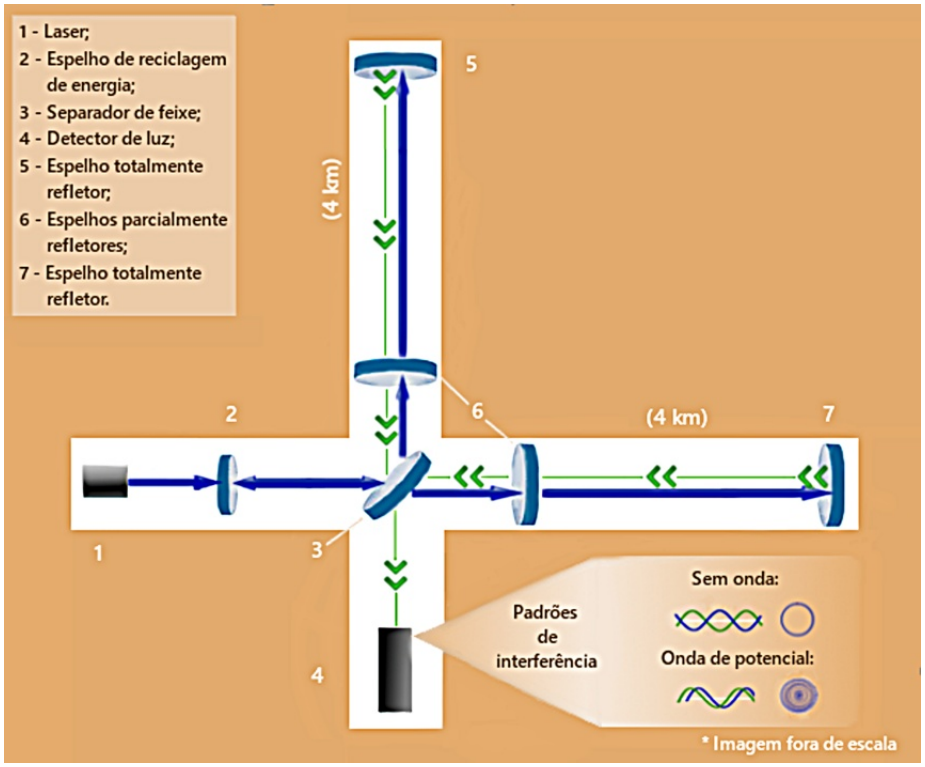
bilhões de anos, e a idade do universo é de 13,8 bilhões de anos. O buraco negro maior tinha 36 vezes a massa do Sol, e o menor tinha "apenas" 29 vezes a massa do Sol. Os raios desses dois buracos negros eram de aproximadamente 106 e 86 km, respectivamente.

Esses dois buracos negros orbitaram um ao outro, cada vez mais perto e cada vez mais rápido, até se fundirem. Logo antes disso acontecer, eles estavam girando um em volta do outro com aproximadamente 8000 rpm, mais ou menos a velocidade de um liquidificador!

O resultado foi um buraco negro com 62 vezes a massa do Sol — e lembre que massa pode ser convertida em energia (através da famosa equação $E = mc^2$), três massas solares foram transformadas em energia e irradiadas como ondas gravitacionais. Isso tudo aconteceu em meio segundo e, durante esse pequeno intervalo de tempo, esse evento emitiu mais energia do que a energia luminosa de todas as estrelas no universo observável!

Futuro

Mais de 10 detecções já foram anunciadas até agora. O detector italiano de ondas gravitacionais Virgo também já está funcionan-



Acima
Esquema de funcionamento dos detectores do LIGO. O divisor de feixes distribui a luz ao longo de dois caminhos perpendiculares entre si. Cada feixe reflete em dois espelhos, um dos quais permite uma fração da luz passar. Quando os dois feixes transmitidos se encontram e interferem, eles cancelam um ao outro — se o comprimento do caminho que eles percorreram permanecesse constante. Mas se uma onda gravitacional passar, ela distorcerá o espaço-tempo e mudará essa distância, criando um padrão de interferência, que poderá ser observado pelo detetor.

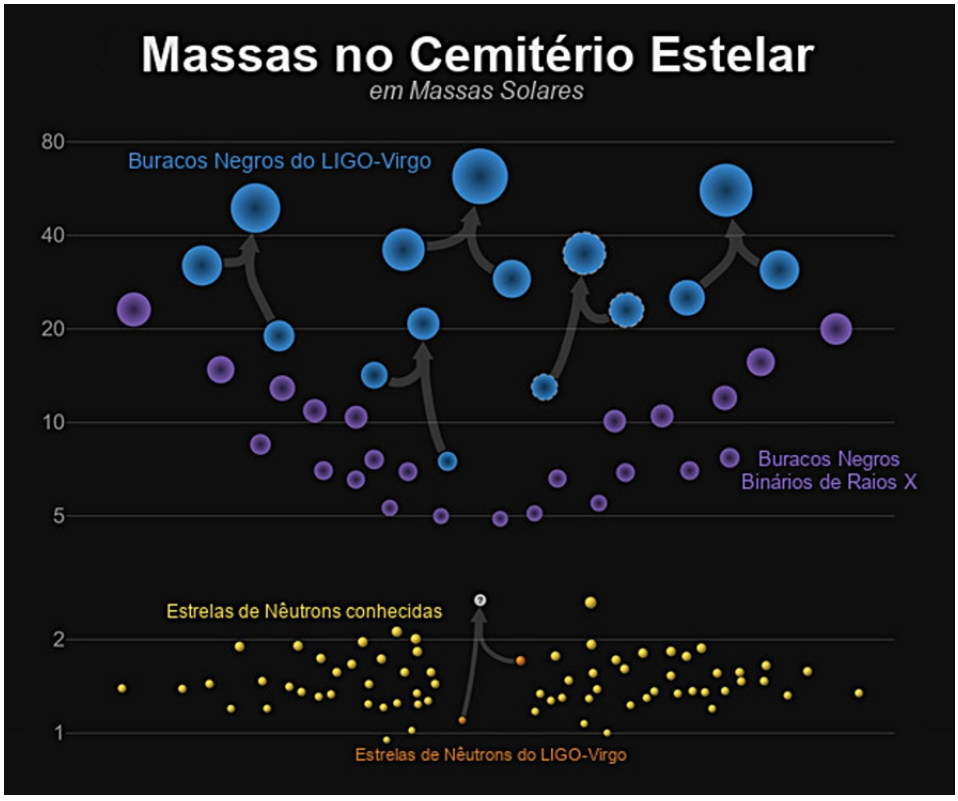
do, e em breve o detector japonês KAGRA vai entrar em funcionamento. Está avançando também o projeto do LIGO-India. Esse esforço mundial vai proporcionar cada vez mais dados e observações.

Futuramente, teremos detectores de terceira geração ainda maiores e na década de 2030 está previsto um detector no espaço, chamado LISA (do inglês *Laser Interferometer Space Antenna*), que será composto de 3 satélites em órbita da Terra.

O que vai sair de todo esse esforço, nós ainda não sabemos. Mas já estamos revolucionando o nosso conhecimento de astrofísica, agora que podemos observar objetos e eventos que não emitem nenhum tipo de luz! Estamos aprendendo a "ver" o universo de uma maneira totalmente diferente, e aprendendo mais sobre a misteriosa curvatura do espaço-tempo que Einstein previu há mais de 100 anos. A teoria da relatividade geral foi testada mais uma vez, mas isso não é o fim da história. Pelo contrário, estamos presenciando o começo de uma nova astronomia.

A pesquisa básica continua, e seu papel é importantíssimo na sociedade. O estudo do nosso universo é feito com a colaboração de cientistas de diversos países, culturas e religiões, deixando suas diferenças de lado para trabalhar juntos. A tecnologia desenvolvida para possibilitar esses grandes projetos científicos pode encontrar aplicações no dia-a-dia, e o fascínio pela ciência continua atraindo crianças, jovens e adolescentes que serão os engenheiros e os técnicos do futuro. A divulgação científica é fundamental para dar visibilidade e continuidade a esses esforços.

Além disso, não podemos esquecer que muitos avanços tecnológicos que temos hoje em dia vieram de pesquisas básicas que não tinham nenhuma aplicação em vista. Não teríamos smartphones sem as pesquisas realizadas desde o século XIX em eletricidade, mate-



Acima
Diagrama de massas das primeiras detecções de ondas gravitacionais, geradas por colisões de buracos negros e estrelas de nêutrons, realizadas pela colaboração LIGO/Virgo de 2015 a 2017 (Crédito: LIGO-Virgo/Frank Elavsky/ Northwestern University).

riais, mecânica quântica, lógica e relatividade!

E Sobral continua exercendo um papel importante na pesquisa científica em relatividade geral, com excelentes pesquisadores na Universidade Estadual Vale do Acaraú e nos *campi* de Sobral do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, da Universidade Estadual do Ceará e da Universidade Federal do Ceará •

Cecilia Chirenti
Univ. Fed. do ABC
cecilia.chirenti@ufabc.edu.br

O eclipse de Sobral

sob o olhar de uma história social da Astronomia

O eclipse de 1919 colocou a pequena Sobral no mapa da Ciência. Descubra como isso aconteceu e quais foram as contribuições dos brasileiros nesse importante evento.

Há que se celebrar o centenário do eclipse total do Sol de 29 de maio de 1919, visível a partir duma estreita faixa de terra que atravessava o Brasil e a África. Afinal, as observações realizadas durante esse eclipse permitiram a comprovação da teoria da relatividade, de Albert Einstein, interpretada, já à época, como uma verdadeira "revolução na ciência". Fato menos conhecido, mas igualmente digno de celebração, a ciência e a tecnologia brasileiras também se fizeram presentes na ocasião, e não apenas porque uma das expedições inglesas encarregadas de verificar a relatividade viu o eclipse no céu de Sobral, no Ceará. O objetivo desse artigo é chamar a atenção para alguns aspectos sociais que, embora apa-

Esquerda
Sobral nos dias atuais, com o rio Aracaú em primeiro plano (Crédito: GLandovsky/ Wikimedia Commons.)

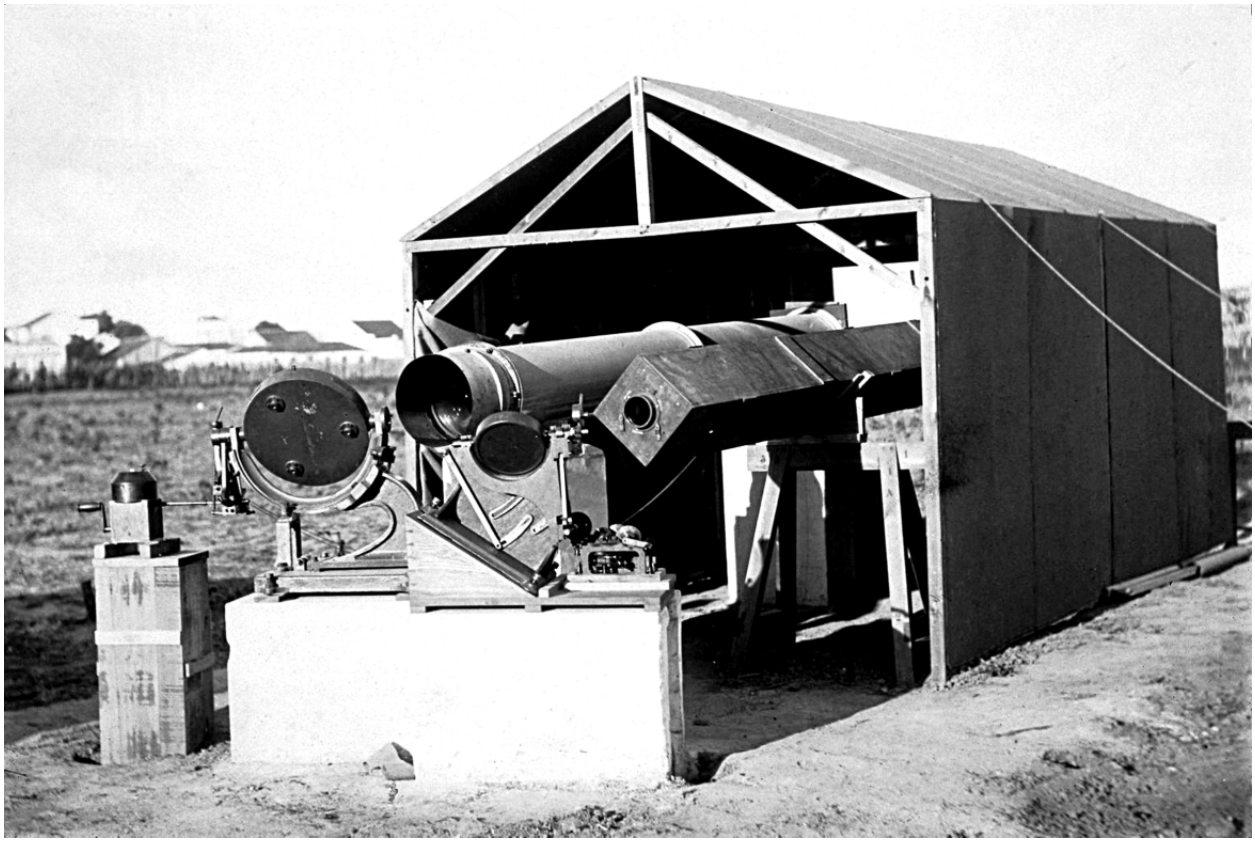
rentemente secundários e pouco comentados, de igual modo contribuíram para coroar de sucesso as observações astronômicas de 1919.

No início do século XX, a prática da realização de expedições astronômicas visando a observação de eclipses totais do Sol nos mais remotos cantos do planeta encontrava-se em seu apogeu. Por um lado, a expansão capitalista das décadas anteriores havia encurtado as distâncias entre os países, tanto em termos geográficos quanto culturais, ao intensificar a circulação de pessoas, mercadorias, notícias, ideias — se bem que, conforme ressaltou o historiador Eric Hobsbawm, essa mesma expansão tivesse gerado e ampliado divisões, sociais e nacionais, nas mesmas proporções. A eclosão da 1.ª Guerra Mundial foi uma das consequências mais dramáticas dessa contradição (a outra sendo a Revolução Russa), e interrompeu quase totalmente o até então intenso fluxo de expedições astronômicas. De fato, até novembro de 1918 (mês da assinatura de um armistício pela Alemanha), os astrônomos ingleses ainda nem sabiam se havia chances reais de conseguirem viajar a fim de observar o eclipse de maio de 1919. Uma vez acertado que viajariam, a existência de uma linha comercial de navegação a vapor entre Manaus e Liverpool decerto facilitou seu transporte e de seus equipamentos em tempo hábil. As duas duplas, formadas respectivamente por Charles Davidson (1875-1970) e Andrew Crommelin (1865-1939), e Arthur Eddington (1882-1944) e Edwin Cottingham (1869-1940), embarcaram juntas no *Anselm* no dia 8 de março, e após uma escala na Ilha da Madeira, onde dividiram-se: a primeira seguiu para o Brasil, enquanto a outra, após trocar de navio, rumou para a Ilha do Príncipe, na costa oeste da África.

De modo análogo, a existência de uma estrada de ferro por onde os pesados e frágeis equipamentos podiam ser transportados do porto até o local de observação, bem como de uma rede de funcionários públicos capazes de su-

prir as equipes com informações meteorológicas e suporte operacional, também eram levadas em conta no planejamento das expedições. No Brasil, onde Davidson e Crommelin aportaram, no dia 23 de março, havia a Estrada de Ferro de Sobral, que ligava o porto de Camocim à cidade. Já no Príncipe, uma pequena ilha de 160 km^2, as informações disponíveis, assim como as condições de acesso e instalação eram bastante precárias. O local foi escolhido pelos astrônomos apenas após o desembarque, a partir de conversas e uma breve inspeção de alguns sítios. A chamada Roça Sandy, afinal escolhida, não era propriamente uma cidade, mas a sede de uma das grandes fazendas produtoras de cacau da ilha, situada numa pequena elevação a noroeste, próxima ao mar. Em seu relatório, Eddington comenta que os pesados equipamentos tiveram que ser transportados até ali no meio da mata, ao longo de cerca de um quilômetro, por carregadores nativos.

Por sua vez, o relato de Crommelin salienta que, no Brasil, todas as providências necessárias haviam sido tomadas de antemão por Henrique Morize (1860-1930), diretor do Observatório Nacional (ON). Em primeiro lugar, ao longo do segundo semestre de 1917, este último havia solicitado aos agentes públicos lotados em



Abaixo
Instrumentos ingleses levados a Sobral. As melhores fotografias foram obtidas com a luneta menor, de 10 cm de abertura, à direita da imagem. Como sua montagem era horizontal, à frente de ambas vê-se os celóstatos montados sobre pilares de pedra. (Crédito: Science Museum)

Acima
Membros das 3 expedições instaladas em Sobral para observar o eclipse de 29 de maio de 1919. Da esquerda para a direita: expedição brasileira: Luiz Rodrigues (1°), Theophilo Lee (2°), Henrique Morize (4°), Allyrio de Mattos (7°), Domingos Costa (9°) e Lélio Gama (10°); expedição inglesa: Charles Davidson (5°) e Andrew Crommelin (6°); expedição norteamericana: Daniel Wise (3°) e Andrew Thomson (8°). (Crédito: Biblioteca de Obras Raras do ON)

cidades brasileiras situadas na faixa de visibilidade do eclipse que lhe enviassem dados meteorológicos especificamente sobre chuva e nebulosidade, por ele retransmitidos à Europa. Vale lembrar que na época o ON havia se transformado em Diretoria de Meteorologia e Astronomia, e com isso, Morize possuía autoridade sobre a rede de estações meteorológicas brasileira. Depois, em uma breve viagem preparativa a Sobral, realizada em março de 1919, o astrônomo brasileiro fez acertos com as autoridades locais de modo a facilitar a recepção e acomodação dos ingleses, assim como o suprimento de trabalhadores e material para a construção de tendas e pilares e a montagem dos equipamentos. Foi pois com base em todas essas variáveis que a subcomissão inglesa para o eclipse selecionou previamente a então pequena cidade nordestina, onde Davidson e Crommelin só chegaram no dia 30 de abril, após visitar Manaus e Belém e conhecer a floresta amazônica; o próprio Morize chegou ali com a equipe do ON no dia 9 de maio. Junto com eles, chegou também um carro, modelo Studebaker, com motorista — doação do ministro da Agricultura para a missão, para facilitar os deslocamentos dos astrônomos estrangeiros (além dos ingleses, havia a

expedição norteamericana). Era a primeira vez que um carro circulava em Sobral.

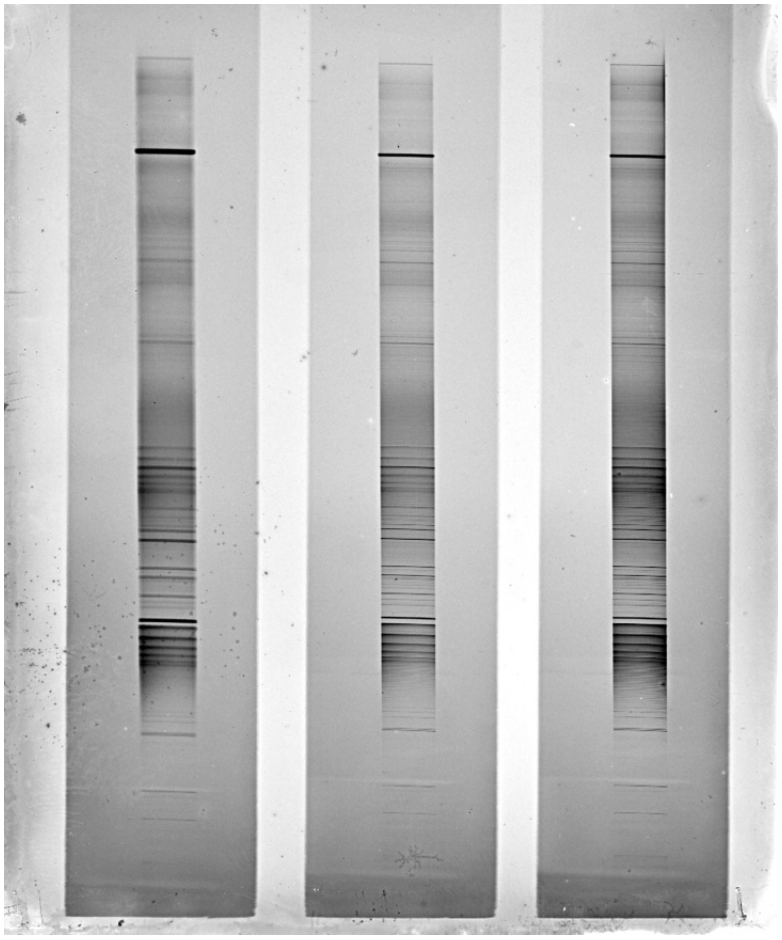
De outro lado, a consolidação da Astrofísica como uma área de investigação promissora havia transformado o Sol em um objeto científico instigante, alimentando o interesse na organização e participação em expedições para observar seus eclipses, não só da parte de amadores endinheirados e dos especialistas, mas também de instituições e, mais eventualmente, governos. No caso da Inglaterra, o aumento desse interesse levara à criação da Comissão Conjunta Permanente para Eclipses (*Joint Permanent Eclipse Committee* — JPEC), em 1894. Formada por membros da Royal Society e da Royal Astronomical Society, essa Comissão contribuiu de forma significativa para a realização das inúmeras expedições astronômicas britânicas do início do século XX, no que diz respeito tanto à coordenação dos esforços dos diferentes observatórios (Cambridge, Oxford e Greenwich), quanto à obtenção, junto ao governo, dos recursos financeiros necessários para a aquisição de instrumentos e a realização das viagens em si. Em contrapartida, o Comitê procurava controlar a publicação dos relatórios e a divulgação dos resultados científicos das expedições. Assim, a famosa sessão de 6 de novembro em que foram apresentados publicamente os resultados que comprovavam a teoria da relatividade foi planejada e convocada pelo JPEC, que aliás, a essa altura, já enviara o relatório para publicação nos *Philosophical Transactions* da Royal Society. Em tempo, a subcomissão do JPEC constituída especialmente para o eclipse de maio de 1919 era constituída pelo Astrônomo Real (diretor do Observatório de Greenwich), Sir Frank Dyson (1868-1939), pelo então presidente da Royal Astronomical Society, Alfred Fowler (1868-1940), pelo diretor do Observatório de Oxford, Herbert Turner (1861-1930), e por Eddington, ele próprio diretor do Observatório de Cambridge.

Foi no campo da Astrofísica que se concentraram os trabalhos da expedição astronômica brasileira enviada a Sobral em 1919. Antes de mais nada, é importante ressaltar que o Brasil também possuía longa — embora modesta — tradição na organização de expedições astronômicas. As iniciativas anteriores do ON no sentido de enviar suas equipes para observar eclipses totais do Sol limitaram-se àqueles visíveis em território brasileiro (1858, 1865, 1893 e 1912), e, embora o estudo da composição química e da estrutura física do Sol não estivesse descartado, seus objetivos variaram basicamente entre a determinação dos tempos dos contatos (1858 e 1865) e a obtenção de fotografias da coroa solar (1893 e 1912). Na verdade, a iniciativa mais ambiciosa — e bem-sucedi-

da — de organizar expedições astronômicas (três, simultaneamente) nem visava a observação de um eclipse solar, mas do trânsito de Vênus sobre o disco do Sol, em 6 de dezembro de 1882.

A expedição brasileira de 1919 era constituída por Morize, os astrônomos Domingos Fernandes da Costa (1882-1956) e Allyrio de Mattos (1889-1975), o matemático Lelio Gama (1892-1981), o químico Theophilus Lee (1873-1926), o meteorologista Luiz Rodrigues, e o mecânico Arthur de Castro Almeida. Entre os equipamentos astronômicos levados a campo constava uma luneta fotográfica de Mailhat, com 15 cm de abertura e 8 m de distância focal, conjugada a um celostato também de Mailhat; um fotoheliógrafo de Steinheil, com 10 cm de abertura e 1,50 m de distância focal; e três espectrógrafos de Hilger, sendo que com o maior deles se poderia obter espectros de 3 × 10 polegadas (8 × 25 cm). As duas lunetas haviam sido adquiridas para o eclipse de 1912, ocasião em que, devido à chuva, não puderam ser utilizadas. Os instrumentos foram instalados na Praça do Patrocínio, em frente à igreja de mesmo

Abaixo
Acampamento brasileiro montado na Praça do Patrocínio. À direita, cruzando a imagem, vê-se os trilhos da Estrada de Ferro de Sobral. À esquerda, a tenda que abrigou a luneta de Mailhat, e no centro da imagem, à frente de uma árvore, a lona escura que devia proteger os 3 espectrógrafos. (Crédito: Biblioteca de Obras Raras do ON)



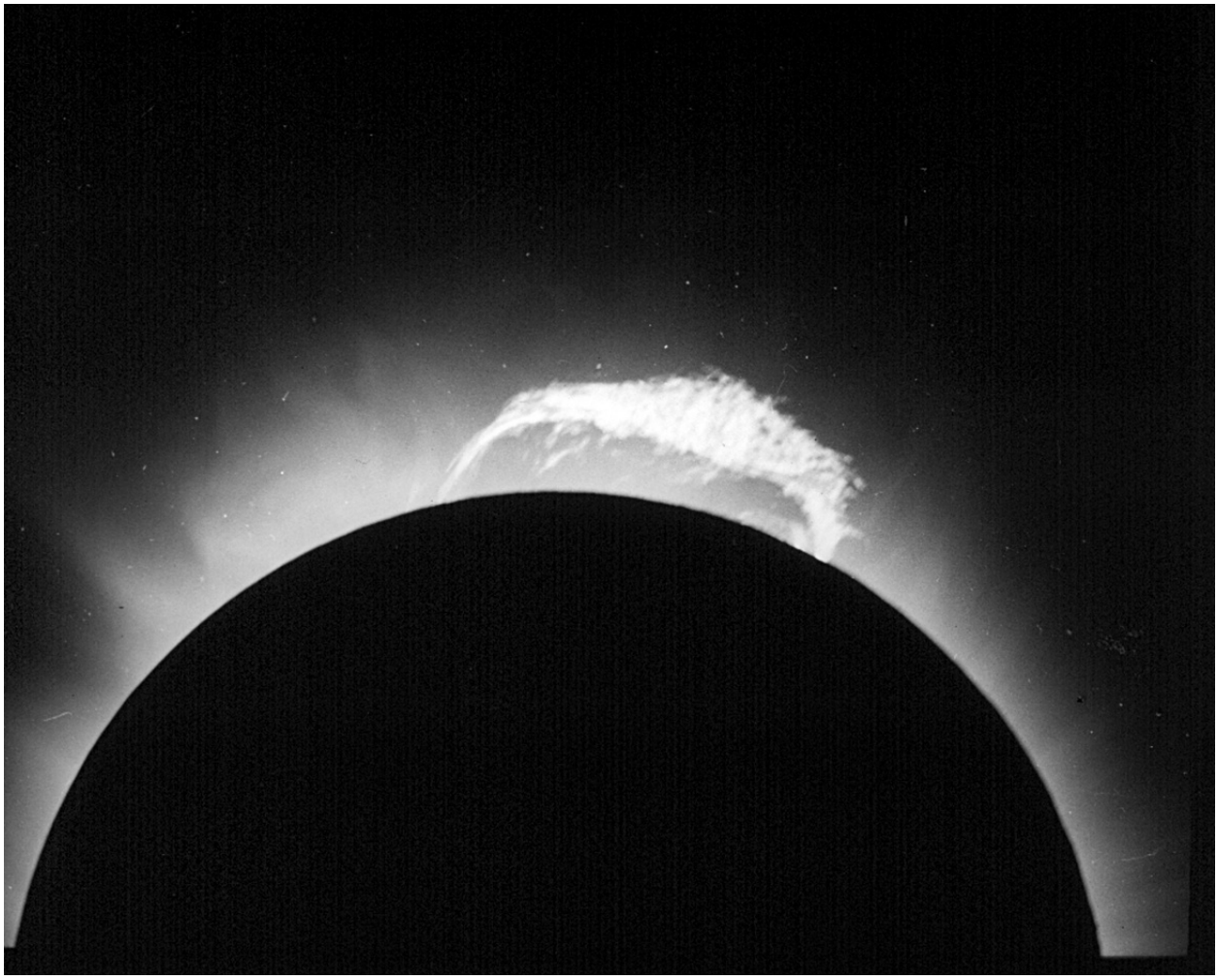
Acima
Espectro da coroa solar, provavelmente obtido por Domingos da Costa. Deve ser ressaltado que a despeito dos primeiros processos fotográficos coloridos terem sido desenvolvidos no início do século XX, eles ainda não eram acessíveis. (Crédito: Biblioteca de Obras Raras do ON)

nome, sob tendas de lona, a fim de protegê-los da poeira, e ficaram a cargo, respectivamente, de Mattos, Morize, e a dupla Costa e Lee. O jovem Lelio Gama ficou encarregado da cronometragem do tempo após o início da totalidade.

Foram tiradas diversas fotografias do espectro da coroa solar, com o objetivo de determinar os comprimentos de onda das linhas indicativas da presença de elementos químicos (como o hidrogênio, o hélio e o coronium, cuja existência se supunha verdadeira). Todavia, segundo Morize, nenhuma placa fotográfica tinha a nitidez necessária para levar adiante essa linha de pesquisas. Já na obtenção de imagens diretas da coroa durante a totalidade os brasileiros foram melhor sucedidos. A despeito de ter enfrentado vários problemas com a luneta de Steinheil, por ele utilizada, Morize conseguiu quatro fotografias, sendo duas avaliadas por ele como “boas”. Mattos obteve sete placas fotográficas, dentre oito programadas, com tempos de exposição diferentes. Em duas fotografias tomadas com menos de 2 segundos de exposição, ainda registrou uma protuberância solar.

A intenção de Morize era utilizar as fotografias diretas da coroa solar para um estudo sobre a variação de seu brilho — um tema de interesse na época. Para tanto, além de submetidas a diferentes tempos de exposição, todas as placas haviam sido previamente sensibilizadas por uma lâmpada colocada a diferentes distâncias, de modo a produzir uma escala fotométrica. Para que o ON desenvolvesse esse estudo, contudo, ainda era preciso ultrapassar alguns obstáculos, a começar pela mudança para o novo local onde deveria funcionar, o campus de São Januário. Em 1919, a instituição ainda estava precariamente instalada no terraço do antigo Colégio dos Jesuítas, no Morro do Castelo, embora as obras em São Januário já tivessem começado e sua biblioteca já funcionasse na Rua José Cristino, em casa

Esta imagem
Negativo de vidro da coroa solar, obtido por Allyrio de Mattos com a luneta de Mailhat. (Crédito: Biblioteca de Obras Raras do ON))



Acima
Positivo em placa de vidro da imagem da protuberância solar, enviada por Morize para publicação na Revista *L' Astronomie*. (Crédito: Biblioteca de Obras Raras do ON)

alugada. Além disso, era necessário adquirir um microfotômetro, para fazer as medições nas placas fotográficas.

As fotografias da protuberância solar foram elogiadas por Charles Perrine (1867-1951), renomado astrônomo norteamericano, então diretor do Observatório de Córdoba, e foram destaque no artigo enviado por Morize para publicação na revista *L' Astronomie*, periódico da Société Astronomique de France. Graças à sua nitidez, Morize procedeu a alguns cálculos das dimensões da "grande" protuberância, como o comprimento do arco e sua altura no ponto mais alto. Crommelin e Davidson também apresentaram um trabalho sobre a mesma protuberância, fotografada meio por acaso pelo primeiro, igualmente descritivo. A diferença é que eles dispunham de fotografias obtidas no Príncipe, e por isso puderam acrescentar algo sobre a rápida movimentação daquela estrutura, verificada no intervalo de cerca de 2 horas que separava a totalidade nos dois locais.

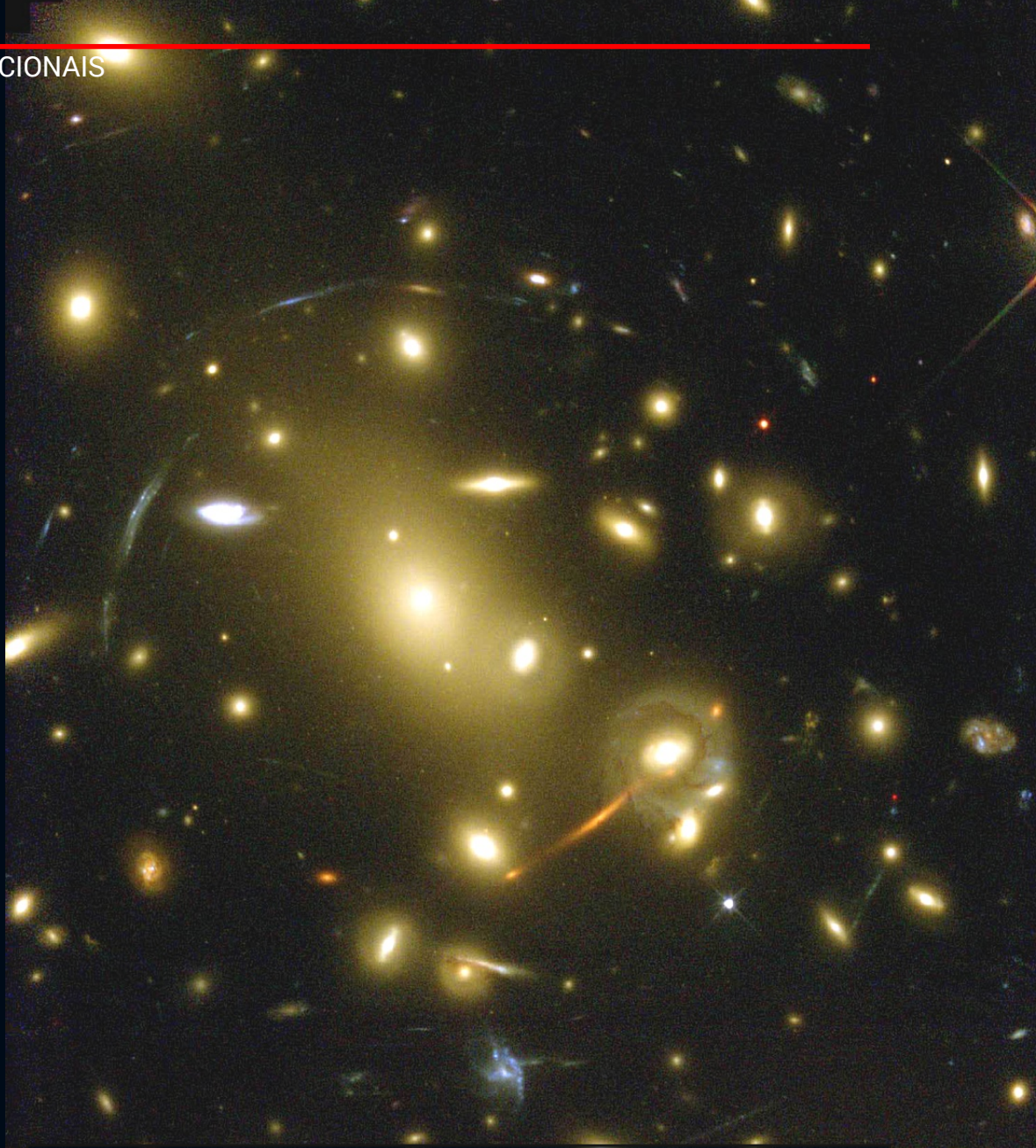
Não resta dúvida de que os bra-

sileiros deram significativa contribuição para o sucesso do eclipse de maio de 1919. Como vimos, Morize e o ON não foram apenas espectadores ou ajudantes dos ingleses, mas parceiros na busca de respostas para algumas questões importantes colocadas pela Ciência da época, entre as quais a composição física e química do Sol. O conhecimento cientifico é por definição uma construção coletiva, e, olhando em retrospecto, a história da conjugação de esforços visando a comprovação da teoria da relatividade é apenas mais um exemplo dessa norma •

Christina Helena Barboza
christina@mast.br
Museu de Astronomia e Ciências Afins

100 anos de lentes gravitacionais

Ao completar um século da primeira medida da deflexão da luz pela gravidade suas consequências têm sido exploradas para sondar o Cosmos, desde a descoberta de novos planetas até a medida das maiores estruturas do Universo.



A luz não andar em linha reta não é novidade para ninguém. Quando colocamos um canudo na água ele parece quebrado, porque a luz muda sua direção ao entrar nesse meio. O mesmo ocorre quando a luz passa do ar para o vidro. E não é só quando a luz muda de meio que isso ocorre. O próprio ar, a temperaturas diferentes (e, portanto, diferentes densidades), pode fazer com que a luz siga um caminho curvo. Quando o asfalto está muito quente, olhando de forma rasante, temos a impressão de que ele está molhado — são as miragens: luz do céu que chega a nossos olhos vindos da direção do asfalto devido à trajetória curva da luz no ar.

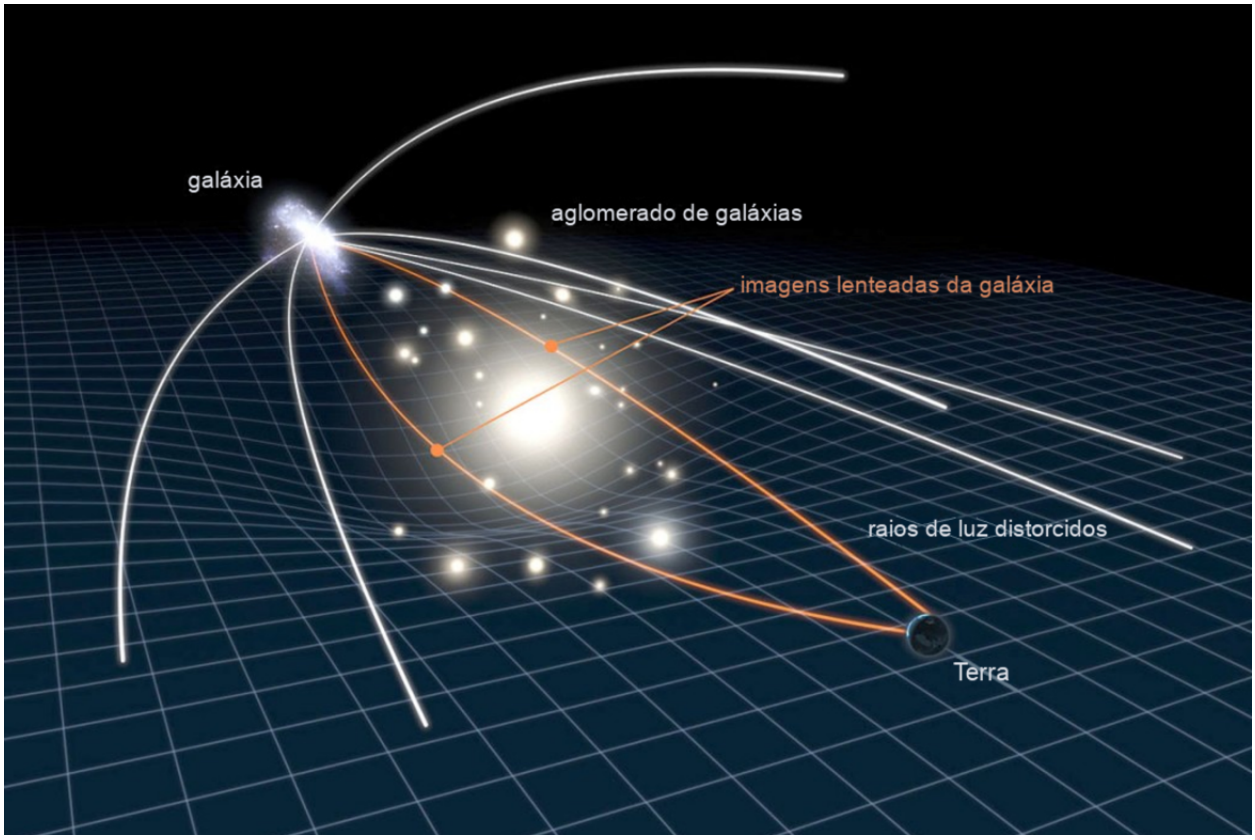
Mas será que a luz poderia ser desviada no vácuo, sem nenhum meio material? Será que um campo gravitacional afeta a trajetória de luz? O próprio Isaac Newton se colocou essa pergunta sem aparentemente propor uma resposta definitiva. Oitenta

anos depois de Newton, pesquisadores ingleses, usando sua teoria, calcularam qual seria o desvio da luz de uma estrela, passando próximo ao Sol, supondo que a luz se comporta como uma partícula material. O resultado foi um ângulo bastante pequeno, 0.84" (o símbolo " denota a medida angular de segundo de arco, que corresponde a 1/3600 de grau, ou 1/1296000 da circunferência). Talvez por ser tão pequeno para as capacidades da época, aparentemente ninguém tentou medir esse ângulo. Posteriormente foi proposta a explicação ondulatória da luz, que reproduzia muito bem vários resultados novos. Se a luz era uma onda eletromagnética, parecia não ter sentido se perguntar se ela seria afetada pela gravidade.

Já em 1905, Albert Einstein, após propor a teoria restrita da relatividade, buscava uma nova teoria da gravitação que fosse compatível com ela. A partir dessa busca, surgiu o conceito do Princípio de Equivalência, pelo qual o movimento de uma partícula em um campo gravitacional é localmente equivalente a seu movimento em um referencial acelerado sem a presença de gravidade. Baseado nesse princípio, em 1911, Einstein estimou que a luz deveria ser sim desviada pela gravidade e esse desvio teria o mesmo valor acima (0.84”), calcu-

Na página anterior
Aglomerado de galáxias Abell 2218. (Crédito: NASA/ESA).

Abaixo
Ilustração das trajetórias da luz saindo de uma galáxia distante e sendo curvadas pela presença de um aglomerado de galáxias no seu caminho até a Terra. A luz proveniente de uma mesma região da galáxia pode seguir duas (ou mais) trajetórias diferentes (em laranja na figura), levando a duas imagens aparentes do mesmo objeto. (Crédito: NASA, ESA, L. Calcada)



Acima
Anel de Einstein ao redor de SDSS J0146-0929 (Crédito: ESA/Hubble & NASA)

lado usando a teoria de Newton. E concluiu que esse desvio poderia ser medido se observássemos a posição de uma estrela situada na direção próxima à do Sol e comparássemos com sua posição quando o Sol se encontra noutra parte da esfera celeste. Apenas durante um eclipse seria possível ver uma estrela próxima do limbo solar. Assim, ele instigou colegas astrônomos a tentarem medir esse pequeno ângulo.

Somente em 1915 ficou pronta a sua teoria completa, chamada de teoria geral da relatividade, segundo a qual a gravidade é ligada à curvatura do espaço-tempo, um conceito então inteiramente novo na Física. Essa nova teoria reproduzia os resultados da teoria de Newton, explicava a precessão da órbita de Mercúrio e previa diversos fenômenos novos. Um desses fenômenos era a deflexão da luz pela gravidade. Na teoria completa, partículas sem massa, como a luz, são afetadas de modo diferente pela curvatura do espaço-tempo do que partículas com massa. O novo cálculo da deflexão da luz com sua teoria final era exatamente o dobro do anterior.

Sobral projeta Einstein

Apenas em 1919 foi possível observar esse fenômeno. Duas equipes lideradas por astrônomos ingleses se instalaram na cidade de Sobral, no estado do Ceará, e na Ilha de Príncipe, próximo à costa da África. Elas conseguiram registrar em chapas fotográficas instaladas em telescópios as posições das estrelas próximas à direção do Sol durante o eclipse e compararam com as posições em

outra época do ano, sem o Sol por perto. O valor obtido pelas duas expedições era compatível com a previsão de Einstein, sendo os resultados mais robustos aqueles obtidos em Sobral. Pela primeira vez uma previsão inteiramente nova e exclusiva da relatividade geral era verificada experimentalmente. Esse resultado correu o mundo e instantaneamente projetou Einstein à fama.

Nestes mais de cem anos da teoria, suas previsões foram sendo corroboradas uma a uma. Talvez as mais surpreendentes sejam o efeito da gravidade na passagem do tempo, a existência das ondas gravitacionais (descobertas em 2015, quando a teoria completou um século) e a existência de buracos negros.

Sim, a gravidade, além de deformar o espaço, afeta o tempo, que também é alterado pelo movimento. Hoje em dia utilizamos esse feito cotidianamente sem ter consciência disso. De fato, o sistema de localização por GPS, como usado nos mais diversos aplicativos de celular, utiliza as ínfimas diferenças entre o tempo de chegada de sinais de rádio provenientes de diferentes satélites que orbitam a Terra para determinar a localização precisa. Se esse sistema ignorasse os efeitos da relatividade sobre a passagem do tempo, o erro na localização pelo GPS seria de 10 km por dia (e se acumularia no tempo)! Ou seja, hoje em dia é como se todos andássemos com um aparelho que funciona com os cálculos da teoria da relatividade geral no bolso.

Nascimento das lentes gravitacionais

Já que a luz é defletida por campos gravitacionais como os do Sol, poderiam estes atuar como lentes? Foi o que Einstein se perguntou, ainda em 1912. A conclusão é que a curvatura da luz

Abaixo
Famoso anel de Einstein, popularmente conhecido como o Gato de Cheshire. (Crédito: NASA/ESA)

por corpos celestes gera efeitos diferentes de uma lente convencional, mas, ainda assim, referimo-nos a eles como "lentes gravitacionais". Imaginemos a luz vinda de uma estrela distante (que denominaremos fonte), passando perto de outra estrela mais próxima que desvia a luz (à qual nos referiremos como lente) e chegando até nós, observadores. Se o observador, a lente e a fonte estiverem quase que perfeitamente alinhados, os raios de luz podem chegar até nós por duas trajetórias diferentes. Ou seja, veríamos a luz de uma mesma estrela vindo de duas direções ligeiramente separadas do céu, gerando uma imagem fictícia, também conhecida como miragem gravitacional! Além de criar essa imagem dupla, ocorre que a luz da fonte pode ser focada em nossa direção e temos uma amplificação do seu brilho. Caso haja alguma variação no brilho da fonte, veremos essa variação em tempos diferentes para cada uma das imagens. Esse efeito, conhecido como defasagem temporal, é devido à luz percorrer uma distância diferente em seus dois caminhos até a Terra, mas também pelo fato de o tempo passar de forma diferente em um campo gravitacional.

Einstein previu todos esses efeitos mesmo antes de completar a relatividade geral. Porém ele achava que eles jamais seriam medidos e, por isso, não lhes deu muita importância. Tais resultados foram publicados apenas 24 anos depois, em 1936, por insistência de um cientista amador. Lá ele esclarecia: "Claro, não há esperança de se observar esse fenômeno diretamente. Primeiro, pois duas estrelas jamais ficariam tão alinhadas. Em segundo, o ângulo seria desafiadoramente pequeno para o poder de resolução de nossos instrumentos".

Einstein estava certo sobre as dificuldades elencadas, mas, felizmente, errado quanto à possibilidade de observar o fenômeno.

Página ao lado
Imagem de uma região do aglomerado de galáxias MACS J1149.6+2223. As galáxias de aparência amarelada nessa figura pertencem ao aglomerado. Já a galáxia espiral ao fundo está mais distante de nós. Na realidade, trata-se de quatro imagens múltiplas de uma mesma galáxia. Essas imagens múltiplas são causadas pelo efeito de lente devido ao campo gravitacional do aglomerado como um todo. Além disso, um braço espiral possui também quatro imagens, mas criadas por uma galáxia individual do aglomerado que está superposta a uma das imagens. Essa imagem é mostrada no destaque dentro da figura. Coincidentemente, uma supernova (explosão de estrela) apareceu nesse braço espiral, dando portanto origem a quatro imagens desse objeto (os pontos amarelos no destaque). A supernova não é vista nas outras imagens da galáxia devido à defasagem temporal entre as imagens. Em duas imagens a supernova já teria aparecido e depois desaparecido. Já em uma das imagens, a supernova apareceu mais de um ano depois desta foto ser registrada, exatamente no local e no momento previsto por vários modelos da lente e com a magnificação esperada. Esta combinação extraordinária das imagens múltiplas com a supernova permitiu testar diversos métodos que modelizam esses sistemas. (Crédito: NASA, ESA, e S. Rodney, T. Treu, P. Kelly, J. Lotz, M. Postman, Z. Levay)

A separação angular entre as duas imagens das estrelas é realmente pequena demais para ser observada ainda hoje (tipicamente milésimos de segundos de arco). No entanto, o efeito de magnificação pode sim ser observado! Como as estrelas estão em movimento na nossa Galáxia, podemos ter um momento em que duas estrelas ficam praticamente alinhadas em relação à Terra e,

depois, voltam a se separar. Nesse momento a magnificação pode ser muito elevada, até de algumas dezenas de vezes. O que se observa, portanto, é uma variação do brilho da estrela no tempo, devido à magnificação, seguindo um padrão bem característico previsto pela teoria. Claro que esses alinhamentos são extremamente raros, mas graças à tecnologia de aquisição e processamento de imagens, é possível monitorar milhões de estrelas e detectar aquelas cujo brilho é afetado pelo efeito de lente. O interessante é que qualquer corpo massivo pode atuar como lente, inclusive planetas, anãs marrons, buracos negros. No caso dos planetas, eles criam uma variação adicional de brilho causado por seu campo gravitacional. Usando esse efeito, já foram descobertos mais de 90 planetas fora do Sistema Solar.

Se Einstein era pessimista quanto à deteção do fenômeno de lente gravitacional, o astrônomo Fritz Zwicky, seu contemporâneo, era muito mais otimista. Em um artigo de 1937 ele afirmou que as galáxias ofereceriam uma possibilidade muito maior que as estrelas para a observação dos efeitos de lente gravitacional.

Zwicky estava certo. Devido a sua massa — centenas de bilhões de vezes maiores que a massa de uma estrela individual — e às distâncias envolvidas, o efeito de lente é muito mais pronunciado para esses sistemas. Nesse caso, a lente é uma galáxia e a fonte é também uma galáxia mais distante ou um quasar. Como a lente não é mais puntiforme, podem existir configurações com uma multiplicidade de imagens elevada e estas imagens podem ser detectadas separadamente com os telescópios atuais, ou seja, realmente vemos várias imagens de uma mesma galáxia de fundo. Além disso, as imagens dessas galáxias podem ser altamente distorcidas gerando os chamados arcos gravitacionais. Se houver um alinhamento quase perfeito entre o observador, lente e fonte, a distorção da galáxia mais distante gera o formato de um anel, também conhecido como *anel de Einstein* (embora tenha sido proposto pela primeira vez por Orest Chwolson em 1924).

Uma miríade de fenômenos e aplicações

Hoje em dia, todos esses fenômenos de lente gravitacional foram observados: grandes magnificações, grandes distorções que formam arcos ou anéis, imagens múltiplas e defasagem temporal entre as imagens. Há ainda um efeito muito sutil, denominado *lenteamento gravitacional fraco*, que só pode ser medido em um número muito grande de galáxias de fundo para ser detectado. Mas ele está presente até nas maiores estruturas e é uma das principais quantidades observáveis de inte-

resse para a cosmologia.

As escalas cobertas pelos fenômenos de lente gravitacional vão desde o interior de nossa Galáxia (lenteamento por estrelas e planetas) até as maiores distâncias cosmológicas observadas. Ao ser sensível à curvatura do espaço-tempo, o efeito de lentes permite mapear onde há matéria (que curva o espaço), seja ela visível ou não, e serve para pesar os objetos astronômicos, como previsto por Zwicky.

Uma conclusão que emerge de todos os estudos com lentes é que há mais matéria que gravita do que matéria visível em qualquer comprimento de onda. Ou seja, a maior parte da matéria é escura, como já era indicado por vários outros tipos de observações astronômicas independentes.

Uma peculiaridade do fenômeno de lente gravitacional é sua grande sensibilidade a pequenas perturbações. Graças a ela podemos descobrir planetas em órbita de estrelas e medir subestruturas das galáxias. A sensibilidade é tanta que no ano passado foi possível detectar uma estrela individual em uma galáxia distante e uma equipe de pesquisadores argumenta ter detectado uma população de planetas em outra galáxia, usando esse fenômeno! Essa sensibilidade às estruturas no interior das galáxias (e também às situadas no caminho da luz até a Terra) torna o efeito de lente uma das formas mais precisas para testar modelos físicos de matéria escura.

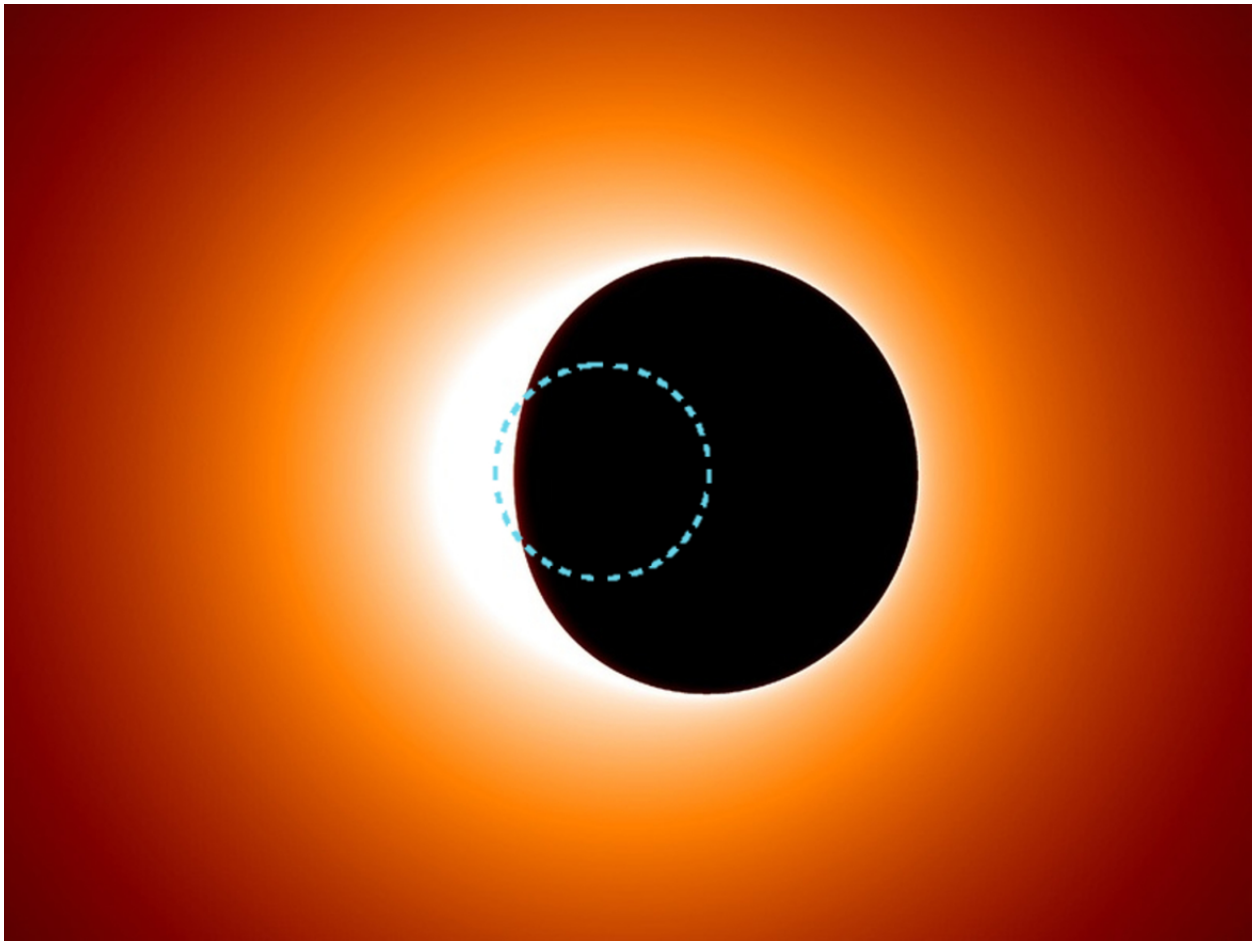
Outro aspecto que vem sendo muito explorado nos últimos anos é a magnificação. Graças a esse efeito, galáxias e aglomerados de galáxias podem atuar como telescópios gravitacionais, aumentando em muito o brilho de galáxias mais distantes. Assim, é possível estudar galáxias fracas e longínquas que não seriam detectadas sem a amplificação gravitacional. Em vários casos, como vemos em detalhe a forma da imagem, é possível reconstruir computacionalmente a forma das galáxias fonte. Uma boa parte do tempo do telescópio espacial Hubble foi recentemente dedicada a observar aglomerados de galáxias que atuam como lentes gravitacionais, permitindo estudos de galáxias distantes e também a reconstrução detalhada da distribuição de matéria na lente.

O efeito de lente também é sensível às distâncias, e na cosmologia as distâncias dependem do modelo cosmológico. Os estudos que usam lentes gravitacionais indicam que, além da matéria escura, uma componente mais uniforme deve responder por cerca de 70% da densidade do Universo, corroborando a presença da energia escura, já evidenciada em vários outros observáveis cosmológicos. Uma alternativa é considerar modificações à gravidade de Einstein. Aí também as lentes gravitacionais permitem formas

únicas de testar essas teorias alternativas. Já que partículas com e sem massa se comportam diferentemente, a combinação de experimentos de lentes gravitacionais (propagação da luz) com outros que testam a dinâmica (como propriedades do gás nas galáxias e aglomerados) permite impor limites a tais teorias.

A sombra de um buraco negro

Para coroar os cem anos da deflexão da luz, formos agraciados há poucas semanas com a difusão da "primeira imagem de um buraco negro". Na imagem que rodou o planeta e estampou todas as manchetes em abril deste ano, vê-se um anel luminoso com um disco preto em seu interior. A parte luminosa corresponde ao disco de acreção, matéria que circunda o buraco negro a altíssimas temperaturas e emite luz em vários comprimentos de onda. Acontece que, pelo efeito da deflexão da luz pelo buraco negro, nós recebemos luz que foi emitida pela parte do disco que está atrás do buraco negro! Por isso, mesmo que estejamos vendo o disco de lado, forma-se um anel



em volta do buraco negro, como na imagem popularizada no filme *interstellar*, que é a deformação visual do disco de acreção pelo caminho curvo da luz. O buraco negro possui uma região, conhecida como horizonte de eventos, da qual nada pode sair, nem mesmo a luz. Muitas pessoas acharam que o disco preto na imagem era esse próprio horizonte. Na verdade, trajetórias de luz próximas ao buraco acabam caindo nele. É como se o buraco negro projetasse uma sombra, dentro da qual nada se vê. O raio dessa sombra corresponde às trajetórias da luz que não podem chegar até nós, e seu tamanho é cerca de 2.6 vezes o tamanho do horizonte. Se o buraco negro está em rotação, ele arrasta o espaço-tempo consigo, a forma da sombra muda um pouco e o anel luminoso fica assimétrico.

Um futuro luminoso

Nas últimas décadas a deflexão da luz se transformou de um teste da relatividade geral em uma ferramenta extremamente útil para a astrofísica e a cosmologia. Vimos um crescimento notável de aplicações e descobertas utilizando o fenômeno de lente gravitacional.

Galileu usou lentes de vidro para ampliar os horizontes do nosso conhecimento sobre o Universo. Os astrônomos da atualidade usam a própria curvatura do espaço-tempo como lentes. Novos instrumentos na Terra e no espaço prometem desenvolver ainda mais essa área e planejam usar o fenômeno de lentes para estudar a formação de galáxias no universo primordial, a natureza da matéria e da energia escuras, descobrir novos planetas e, principalmente, buscar o inesperado •

Martin Makler
Centro Bras. de Pesquisas Físicas
martin@cbpf.br

Na página anterior
Imagem simulada da sombra de um buraco negro. Quando este objeto é circundado por matéria que cai no buraco negro, a emissão de luz (e ondas de rádio) ocorre até uma distância de 1,5 vezes o raio do horizonte, a chamada esfera de luz, cujo raio é mostrado pelo círculo tracejado. Pelo desvio da luz pela gravidade, essa esfera acaba sendo deformada em um anel e podemos ver inclusive a parte que está atrás do buraco negro. Também pelo desvio da luz, esse anel fica com um raio aparente de cerca de 2,6 vezes o tamanho do horizonte. Esse é o tamanho da sombra projetada pelo buraco negro. Se ele está em rotação, o espaço-tempo também é arrastado por esse movimento e a forma do anel fica assimétrica. (Crédito: M. Moscibrodzka & H. Falcke, Radboud-Universität Nimwegen)

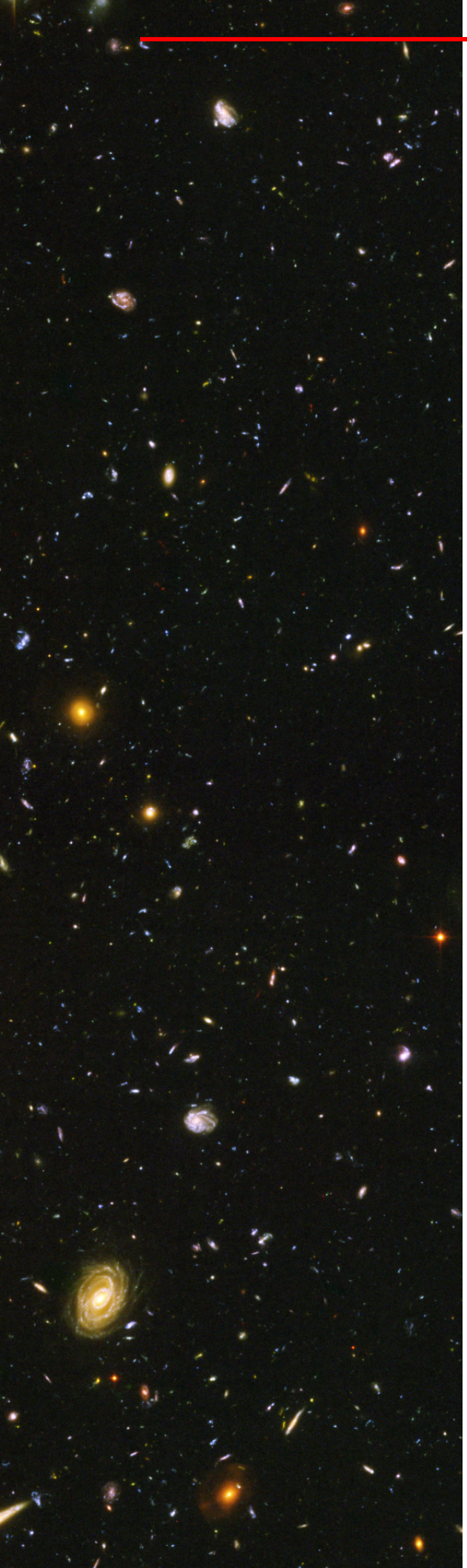
Galáxias em um universo relativístico

Einstein não reconheceu de imediato que sua teoria implicava um universo em expansão. Mas as evidências apresentadas por Edwin Hubble fizeram-no admitir que tinha errado.

Já se passaram 100 anos desde o dia do eclipse solar de 2019 que confirmou de maneira espetacular as previsões de Einstein. O espaço-tempo é curvo! Desde então, o nosso entendimento do Universo nunca mais foi o mesmo.

Por outro lado, vale lembrar também que essa não foi a única descoberta importante do século XX. Na verdade, a Teoria da Relatividade abriu as portas para uma revolução profunda no que entendemos por Universo.

Por exemplo, vale lembrar que em 1919, não sabíamos nem mesmo da existência de outras galáxias. Elas eram visíveis no céu noturno, claro, mas não havia consenso entre os astrônomos da época se aqueles objetos nebu-



Esquerda
Imagem ultraprofunda do telescópio espacial Hubble com quase 10.000 galáxias. As mais distantes estão a dezenas de bilhões de anos-luz de distância (Créditos: NASA, ESA, S. Beckwith, HUDF Team).

losos seriam “universos-ilha” (ou seja, um conjunto de estrelas comparável à nossa própria Galáxia, a Via Láctea) ou apenas um aglomerado de estrelas dentro da Via Láctea.

Coube ao pesquisador estadunidense Edwin Hubble realizar as medidas determinantes, em 1925. Através de observações de estrelas com um brilho variável — as chamadas cefeidas — Hubble conseguiu determinar a distância aos universos-ilha, concluindo que seriam muito maiores que as dimensões da Via Láctea. A nossa Galáxia não era mais a única do Universo!

O Universo como um livro de retratos

As novas dimensões do Universo teriam uma implicação importante para observações astronômicas. Devido à velocidade finita da luz (algo também fundamental para a Teoria da Relatividade), o que era observado no céu teria levado uma certa quantidade de tempo para chegar até nós.

Podemos pensar nisso ao revés: imagine um extraterrestre que observe a Terra a partir do centro da Galáxia. A uma distância de 25.000 anos-luz, ele veria com seu telescópio os homens pré-históricos e as primeiras ferramentas. Um extraterrestre na galáxia de Andrômeda, a 2,5 milhões de anos-luz de distância, veria nossos ancestrais das cavernas cobertos de pelos. E um alienígena na galáxia

NGC 1052, a 65 milhões de anos-luz de distância, estaria vendo a extinção dos dinossauros!

Do nosso ponto de vista, podemos imaginar que estamos vendo um álbum de retratos do Universo. Galáxias mais distantes representam um passado cada vez mais longínquo. Mas qual seria o limite?

Hubble e o Universo em expansão

Novamente, as observações de Hubble representaram um passo importante na nossa compreensão cosmológica. Ao determinar em 1929 que todas as galáxias se afastavam de nós, e as mais distantes com velocidades maiores, Hubble mostrou que o Universo não era estático, mas estava em crescimento.

A medida só foi possível graças a outro efeito importante: o desvio para o vermelho, ou *redshift* em inglês. A luz não apenas é desviada na relatividade de Einstein, mas quando o Universo se expande, fótons de luz se expandem com ele. Objetos azuis ficam mais avermelhados, indicando o quanto ele se afastou de nós devido ao crescimento do espaço desde que a luz foi emitida.

Einstein acreditava em um universo estacionário, mas Hubble mostrou que ele estava enganado. Einstein então admitiu a falha, chamando sua hipótese de seu "maior erro".

O estudo contemporâneo da Cosmologia

Hoje, o estudo de galáxias é uma das principais formas que temos de estudar o crescimento do Universo. Como faróis na escuridão, galáxias servem como pontos de referência para determinar a história do cosmos desde o Big Bang até os dias atuais.

Usando as equações da Relatividade Geral, os astrônomos podem determinar com precisão como as galáxias e as estruturas se formam no Universo. É um balanço delicado entre os seus diversos componentes, a matéria escura que tudo atrai com sua força gravitacional contra a energia escura, empurrando o Universo em direção a um destino frio e desolado.

Acima
Observatório de Mount Wilson, usado pelo astrônomo Edwin Hubble em suas descobertas (Créditos: Observatório Mt. Wilson).

Nosso domínio da teoria é tão avançado que podemos hoje criar pequenos universos em supercomputadores. Usamos todas as equações e simulamos toda a história cósmica, começando no Big Bang. Depois, apontamos nossos telescópios para os céus para conferir os resultados, e verificar as previsões.

O grande desafio é justamente observar esse processo. Se por um lado a matéria escura e a energia escura dominam a evolução do Universo, por outro devemos lembrar que são substâncias invisíveis a qualquer instrumento humano. Assim, somos obrigados a observar galáxias traçando essa evolução, como passas em um bolo invisível assando em um forno a uma temperatura desconhecida.

A próxima fronteira — JWST e as primeiras galáxias

Qual é o próximo passo? Estudar as primeiras galáxias. Lembrem-se: quanto mais distantes, mais tempo a luz levou para chegar até nós, o que quer dizer que estamos observando um Universo mais jovem.

Nesse sentido, as primeiras galáxias representam uma chance de estudar o Universo em sua infância. Hoje já podemos ver galáxias como eram há 13 bilhões de anos, quando o Universo tinha apenas 500 milhões de anos. No entanto, ainda são objetos raros, o que dificulta as pesquisas.

Tudo isso vai mudar com a che-

Acima
Engenheiros da NASA trabalham no belo espelho dourado do telescópio espacial JWST (Créditos: NASA/Desiree Stover).

gada dos novos instrumentos. Telescópios gigantes, grandes inovações tecnológicas, e em particular o Telescópio Espacial James Webb (JWST). Conhecido como o sucessor do Hubble, ele terá 6,5 m de diâmetro e será um dos instrumentos científicos mais aguardados da história. Está alguns anos atrasados, é verdade, mas será uma importante revolução quando for lançado em 2021.

A essas distâncias, o *redshift* é tão intenso que a luz deixa de ser visível para virar radiação infravermelha. Assim, o James Webb tem espelhos revestidos a ouro, material indicado para refletir a luz infravermelha e detectar as primeiras galáxias.

A História nos mostra que a Astronomia é uma constante busca pelo desconhecido, usando observações de galáxias para entender a própria estrutura do Universo. Uma exploração cosmológica que começou há 100 anos, com um pequeno desvio de luz de uma estrela atrás do Sol, mas que se transformou em uma epopeia sideral em busca de nossas origens •

Thiago Signorini Gonçalves
Univ. Fed. do Rio de Janeiro
tsg@astro.ufrj.br

Nesta página
Galáxia do Redemoinho (M 51), a 25 milhões de anos-luz de distância, observada com o telescópio espacial Hubble (Créditos: NASA, Hubble Heritage Team, STScI/AURA, ESA, S. Beckwith, Robert Gendler).

IAU

100 Years: Under One Sky

Participe

https://nocbrasil2018.wixsite.com/nomeieexomundos
facebook/NomeieExoMundos

HD 23079 e seu planeta serão nomeados pelos brasileiros.
Fique ligado e participe da escolha!

NomeieExoMundos

Imagem © David A. Hardy/www.astroart.org

XLIII REUNIÃO ANUAL DA

SOCIEDADE ASTRONÔMICA BRASILEIRA

9 A 12 DE SETEMBRO

Submissão de resumos e solicitação de auxílio:
3 de abril a 31 de maio

Local: CDI - USP
Av. Prof. Lúcio Martins Rodrigues, 222
Butantã, Cidade Universitária
São Paulo, SP 05508-020

Para mais informações, acesse:
www.sab-astro.org.br

Realização:

S.A.B
Sociedade Astronômica Brasileira

Patrocinadores:

CNPq
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

FAPERJ
Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro

FAPESP

FAPEMIG

65 anos CAPES

KEYNOTE SPEAKERS

ADRIANA VALIO
CRAAM/Mackenzie University
"The Impact of Stellar Activity on Orbiting Planets"

CHRIS SNEDEN
University of Texas
"Chemical Compositions of Low Metallicity Stars: Fe-group and Neutron-Capture Elements"

JAMES BINNEY
Oxford University
"Modelling our Galaxy with Gaia data"

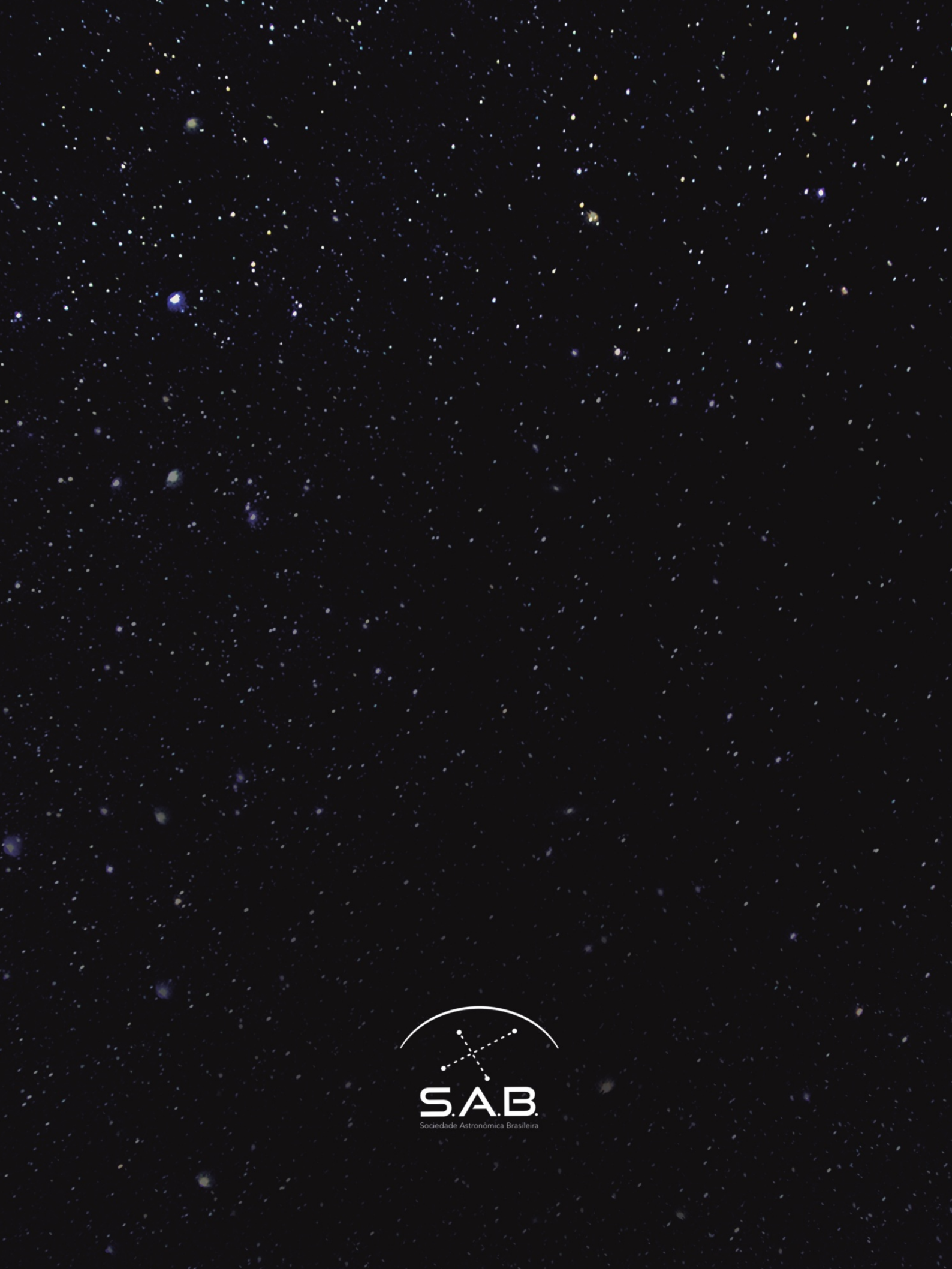
MARTA VOLONTERI
Institut d'Astrophysique de Paris
"The Evolution of Massive Black Holes in Galaxies"

RICHARD ELLIS
University College London
"Early Galaxy Formation"

STEPHANIE SLATER
Center for Astronomy & Physics Education Research
"Astronomy Education: A Global Development Perspective"

TIM HECKMAN
Johns Hopkins University
"Feedback and the Evolution of Galaxies"

XAVIER BARCONS
European Southern Observatory
"The ESO Programme"


S.A.B.
Sociedade Astronômica Brasileira